

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta bezpečnostního inženýrství**  
Katedra ochrany obyvatelstva



# **Kaskádní efekty v systému kritické infrastruktury**

Autoreferát disertační práce

<b>Autor:</b>	<b>Ing. Veronika Brabcová</b>
<b>Školitel:</b>	<b>doc. Ing. David Řehák, Ph.D.</b>
<b>Studijní program:</b>	<b>Požární ochrana a průmyslová bezpečnost</b>
<b>Studijní obor:</b>	<b>Požární ochrana a bezpečnost</b>

**OSTRAVA 2019**

## **Anotace**

BRABCOVÁ, Veronika. Kaskádní efekty v systému kritické infrastruktury. [Disertační práce]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, 2019. 127 s.

Disertační práce se zabývá problematikou kaskádních efektů v systému kritické infrastruktury. Práce je členěna do tří posloupných částí. První část je věnována teoretickému vymezení řešené problematiky, kde je provedena deskripce systému kritické infrastruktury a deskripce pododvětví elektroenergetiky. Analytická část práce je prvotně zaměřena na analýzu nežádoucích událostí a jejich dopady. V návaznosti na problematiku vazeb v systému kritické infrastruktury je provedena analýza závislostí železniční infrastruktury na pododvětví elektrické energie. Dále je analytická část věnována analýze stávajících přístupů k hodnocení kaskádního efektu a analýze faktorů ovlivňujících charakter šíření a roveň intenzity kaskádního efektu.

Stěžejní částí práce je návrh postupu hodnocení kaskádního efektu v systému kritické infrastruktury. Tento postup hodnocení je primárně navržen pro technická odvětví kritické infrastruktury a sestává z devíti kroků. Nejprve je zaměřen na vymezení hodnoceného území společně s výběrem iniciačního prvku, prostřednictvím kterého budou dále posuzovány další dependentní prvky v rámci zvoleného subsystému. Na základě těchto informací lze vykreslit strukturální mapu kaskádního efektu. Dále postup zahrnuje stanovení intenzity vazby a úrovně resilience posuzovaných prvků. V této návaznosti může být následně stanovena úroveň rizika šíření kaskádního efektu. Posledním krokem je vyhodnocení šíření kaskádního efektu, na základě kterého lze určit kritické dependentní prvky a provést jejich prioritizaci za účelem případného přijetí bezpečnostních opatření.

**Klíčová slova:** kritická infrastruktura, kaskádní efekt, resilience, vazba, elektroenergetika, distribuční soustava elektrické energie, postup hodnocení

## **Annotation**

BRABCOVA, Veronika. *Cascading effects in a critical infrastructure system*. [Doctoral Dissertation]. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Safety Engineering, 2019. 127 p.

Dissertation is focused on problematics of cascading effects in a critical infrastructure system. Dissertation is divided into three related parts. The theoretical part obtains description of critical infrastructure system and description of electricity sub-sector. Analytical part is focused on the analysis of unwanted events and their impacts. Following the issue of the linkage in the critical infrastructure system, the analysis of the dependency of the railway infrastructure on the electricity sub-sector is perform/realize. Further is the analytical part dedicate to the analysis of existing approaches to the assessment the cascade effect and to the analysis of factors influencing the character of the spread and the level of cascade effect intensity.

Crucial part of the dissertation is a draft of procedure for assessing the cascading effect in a critical infrastructure system. This procedure of assessing is primarily designed for technical sectors of critical infrastructure systems and consists of nine steps. First is focused on determination of the assessed territory along with selecting the initiatory element, through which further dependent elements within the selected subsystem will be assessed. Based on this information, can be depict a structural map of the cascading effect. Farther involves setting of linkages intensity and resilience level of the selected elements. Subsequently, the level of risk of spreading the cascading effect may be determined. The final step is the assessment of the spread of the cascade effect, by which the critical dependent elements can be identified and prioritized to take security measures.

**Keywords:** critical infrastructure, cascading effect, resilience, linkage, electricity, electricity distribution system, assessment

## **Obsah**

Úvod.....	4
1 Cíl a omezení disertační práce .....	5
2 Teoretické vymezení řešené problematiky .....	6
3 Analýza řešené problematiky .....	7
4 Návrh postupu hodnocení kaskádního efektu v systému kritické infrastruktury.....	8
4.1 Rámec hodnocení kaskádního efektu .....	8
4.2 Postup hodnocení kaskádního efektu .....	10
4.3 Kritéria hodnocení kaskádního efektu .....	15
4.3.1 Kritéria hodnocení intenzity vazby .....	16
4.3.2 Kritéria hodnocení resilience.....	21
Závěr.....	23
Výběr bibliografických zdrojů .....	25
Publikační činnost.....	28

## Úvod

Společnost je již od nepaměti závislá na zajištění základních životních potřeb. Její postupný rozvoj se odráží zejména na její závislosti na řadě služeb, které využívá při každodenních činnostech. Příkladem může být dodávka elektrické energie či poskytování nouzových služeb. Tyto služby jsou provozovány prostřednictvím jednotlivých infrastruktur, přičemž ty z nich, které mají v případě narušení nebo selhání zásadní dopad na fungování společnosti, jsou označovány jako kritické (Rada Evropské unie, 2008). Rozvojem technologií jsou kritické infrastruktury čím dál více vzájemně provázané a v některých případech i vzájemně závislé (Rinaldi et al., 2001; Pederson et al., 2006). Z hlediska závislostí lze konstatovat, že nejvýznamnější infrastrukturou je elektroenergetika. Významnost této infrastruktury vychází mimo jiné z prezidentské směrnice PPD-21 (The White House, 2013), která ji označuje jako unikátně kritickou.

S postupným vývojem společnosti se rozvíjí také spektrum hrozeb, které mohou na infrastruktury negativně působit. Prostřednictvím svého působení mohou tyto hrozby zapříčinit nejrůznější dopady v souvislosti s narušením či kompletním selháním infrastruktury. V kontextu s problematikou kritické infrastruktury se jedná o dopady na státem chráněné zájmy, tj. bezpečnost státu, ekonomiku a základní životní potřeby obyvatelstva (Rada Evropské unie, 2008).

Každý systém je do jisté míry odolný vůči působení hrozeb, jinak tomu není ani u kritické infrastruktury. Důvodem je jeho schopnost absorbovat zmíněné působení hrozeb a následně se adaptovat a obnovovat svou činnost. Toto představuje tzv. úroveň resilience, prostřednictvím které je možné posuzovat prvky z pohledu jejich „náchylnosti“ na působení hrozeb. Velkou roli v tomto systému sehrávají také vazby mezi jednotlivými subsystémy. Tyto vazby se podílejí nejen na zajištění jeho správného fungování, ale také umožňují šíření dopadů napříč celým systémem. Tento jev se nazývá kaskádní efekt (Rinaldi et al., 2001).

V kontextu výše uvedeného lze konstatovat, že kaskádní efekt představuje jev, který nastává při situaci, kdy dojde k narušení funkce influenčního prvku, který skrze dopady svého poruchového stavu ovlivní funkci prvků dependentních (Rinaldi et al., 2001). V případě, že mezi prvky infrastruktur existuje vazba, může v návaznosti na vznik selhání funkce některého z těchto prvků prostřednictvím této vazby docházet k šíření dopadů na základě již zmíněného kaskádního efektu.

Znalost směru šíření společně s intenzitou, jakou působí daná hrozba na prvek, v kombinaci s posouzením úrovně resilience daného prvku, může významně napomoci k pochopení problematiky kaskádních efektů. Rovněž lze konstatovat, že právě predikce šíření kaskádního efektu uvnitř systému kritické infrastruktury může výrazně přispět k zajištění bezpečnosti státu, ekonomiky a základních životních potřeb obyvatelstva.

## 1 Cíl a omezení disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je vytvoření postupu hodnocení kaskádního efektu v systému kritické infrastruktury se zaměřením na elektroenergetiku. Tento postup je určen pro potřeby subjektů kritické infrastruktury a zainteresovaných orgánů státní správy a samosprávy.

Výběr předloženého cíle byl determinován následujícími skutečnostmi:

- odvětví elektroenergetiky je na základě své funkce, kterou poskytuje napříč všem závislými odvětvími kritické infrastruktury, považováno za unikátně kritické ([The White House, 2013](#));
- narušení nebo selhání dodávek elektrické energie má významný dopad na závislá odvětví systému kritické infrastruktury a společně s narušením jejich funkčnosti vytváří synergický efekt působení dopadů na fungování společnosti ([Řehák et al., 2016a](#));
- neexistence postupu systémového hodnocení kaskádního efektu v systému kritické infrastruktury v České republice.

K naplnění hlavního cíle disertační práce byly stanoveny následující dílčí cíle:

- analýza dopadů nežádoucích událostí na elektroenergetiku;
- analýza závislosti železniční infrastruktury na pododvětví elektroenergetiky;
- analýza stávajících přístupů k hodnocení kaskádního efektu,
- analýza faktorů ovlivňujících charakter šíření a úroveň intenzity kaskádního efektu.

Omezení disertační práce:

- z důvodu značného rozsahu systému železniční dopravy je práce zaměřena pouze na hodnocení železniční infrastruktury;
- z důvodu rozsahu řešené problematiky nejsou v disertační práci řešeny subjekty železniční dopravy a jimi poskytované služby;
- práce se rovněž nezabývá posuzováním vlakových souprav;
- daná problematika je primárně řešena z pohledu Správy železniční dopravní cesty, státní organizace, jakožto nejvýznamnějšího provozovatele drah na území České republiky;
- problematika je řešena pouze na regionální úrovni, tj. na úrovni oblastních ředitelství Správy železniční dopravní cesty, státní organizace;
- zkoumání dané problematiky je realizováno z makroskopického pohledu, tzn., že jsou zkoumány ucelené komponenty systému a to bez ohledu na jejich detailní strukturu.

## 2 Teoretické vymezení řešené problematiky

Kritická infrastruktura představuje systém tvořený dílčími komponentami v podobě odvětví, pododvětví a prvků, které svou funkcí zajišťují různorodé služby, jejichž narušení by se mohlo projevit závažným dopadem na bezpečnost státu, zabezpečení základních životních potřeb obyvatelstva, zdraví osob nebo ekonomiku státu ([Zákon 240, 2000](#)).

Systém kritické infrastruktury je charakteristický pro svou provázanost, kterou zajišťují nejrůznější typy vazeb. Jedno z nejnámějších členění vazeb prezentují Rinaldi et al. ([2001](#)), na které další autoři ve svých pracích navazují. Existuje však řada dalších pohledů na zmíněné členění typů vazeb. Ze zjištěných poznatků lze konstatovat, že tito autoři často pracují s pojmy, jako je vzájemná závislost, závislost či vliv.

Na systém kritické infrastruktury neustále působí hrozby, ať už naturogenního či antropogenního charakteru. Prostřednictvím kombinace jejich negativního působení a existence vazeb může vést k narušení funkce influentního subsystému, který skrze dopady svého poruchového stavu ovlivní funkci dependentních subsystémů, tj. kaskádní efekt. Znalost směru šíření dopadů (tj. vazby mezi těmito subsystémy) v kombinaci s intenzitou (tj. působení hrozby na daný subsystém), a úrovní jejich resilience může vést na základě predikce k minimalizaci dopadů. Na základě tohoto lze konstatovat, že predikce může významně přispět k zajištění bezpečnosti státu, ekonomiky a základních životní potřeby obyvatelstva.

Odvětví energetiky a dopravy bylo na základě směrnice ([Rada Evropské unie, 2008](#)) určeno jako součást evropské kritické infrastruktury. V rámci dokumentu ([The White House, 2013](#)) je subsystém elektroenergetiky dokonce považován za unikátně kritický. Důvodem je jeho funkce, kterou poskytuje napříč celým systémem kritické infrastruktury, čímž se stává nepostradatelným, jelikož naprostá většina odvětví je na dodávkách elektrické energie závislá.

Na základě negativního působení nežádoucích událostí na subsystém elektroenergetiky, lze předpokládat vznik dopadů prostřednictvím narušení funkce tohoto pododvětví včetně jeho dependentních subsystémů. S tím jsou spojené také dopady na zdraví a životy osob, životní prostředí, sociální dopady a také dopady mající mezinárodní charakter a další. Šíření těchto dopadů výrazně ovlivňují faktory jako je resilience prvků kritické infrastruktury a charakter vazby, který určuje směr a intenzitu šíření.

### 3 Analýza řešené problematiky

Systém kritické infrastruktury neustále odolává působení nejrůznějších nežádoucích událostí, které mohou svým negativním působením zapříčinit řadu dopadů. Na základě provedené analýzy dopadů působení nežádoucích událostí na pododvětví elektroenergetiky, se zaměřením na prvky distribuční soustavy, lze konstatovat následující. Na distribuční soustavu elektrické energie na území České republiky působí nejrůznější hrozby naturogenního, antropogenního či procesně-technologického charakteru. Většina z nich svým působením může zapříčinit dopady v podobě selhání funkce posuzovaného prvku DS elektrické energie.

Výjimkou jsou silné mrazy, které samy o sobě nepředstavují pro posuzovaný prvek problém, avšak v případě, že dojde z oteplení a poté teplota klesne pod bod mrazu (viz námrazové jevy), lze z důvodu roztažnosti vody očekávat selhání funkce všech posuzovaných prvků. Obdobně jako je tomu u nežádoucích událostí jako jsou silné mrazy, tak i technologické havárie v podobě úniku nebezpečné látky či narušení dodávek vody velkého rozsahu nepředpokládá se u posuzovaných prvků selhání vznik dopadů. Za zmínku stojí kybernetické útoky, které představují díky automatizaci elektrických sítí jedno z významných ohrožení distribuční sítě. Právě neexistence standardů pro oblast kybernetické bezpečnosti v souvislosti s distribuční sítí elektrické představuje jeden z hlavních nedostatků ([Massive Alliance, 2017](#)).

Uvnitř DS elektrické energie existují vzájemné závislosti. V návaznosti na analýzu závislostí železniční infrastruktury na pododvětví elektroenergetiky je patrná závislost kritických prvků železniční infrastruktury na kritických prvcích DS elektrické energie. Hlavním důvodem jsou elektrické zařízení, bez kterých nelze zajistit funkčnost železniční infrastruktury, které jsou však plně závislé na dodávkách elektrické energie.

Vazby jsou determinovány několika aspekty, ať už se jedná o typ vazby, viz Rinaldi et al. ([2001](#)), úroveň vazby, kde se rozlišuje vazba systémová, sektorová a nebo subsektorová vazba či hledisko existence substitute vazby a další. Právě tyto aspekty představují nedílnou součást při stanovování intenzity vazby. Opomenout nelze ani resilienci prvku, neboť čím více je posuzovaný prvek resilientní, tím méně se stává náchylným k dopadům v rámci působení nežádoucích událostí, které se šíří prostřednictvím vazeb. Lze tedy konstatovat, že resilience prvku v souvislosti s intenzitou vazby představuje důležitou součást v rámci posuzování kaskádního efektu uvnitř systému kritické infrastruktury.

Ačkoli se hodnocením kaskádního efektu zabývá řada autorů, jako jsou například Bie a Wang ([2002](#)), Hassel et al. ([2014](#)), Renger et al. ([2017](#)), Zuccaro et al. ([2018](#)) či Gonzva et al. ([2016](#)), představuje přístup v kombinaci s resiliencí posuzovaného prvku jedinečný pohled na zkoumání dané problematiky.



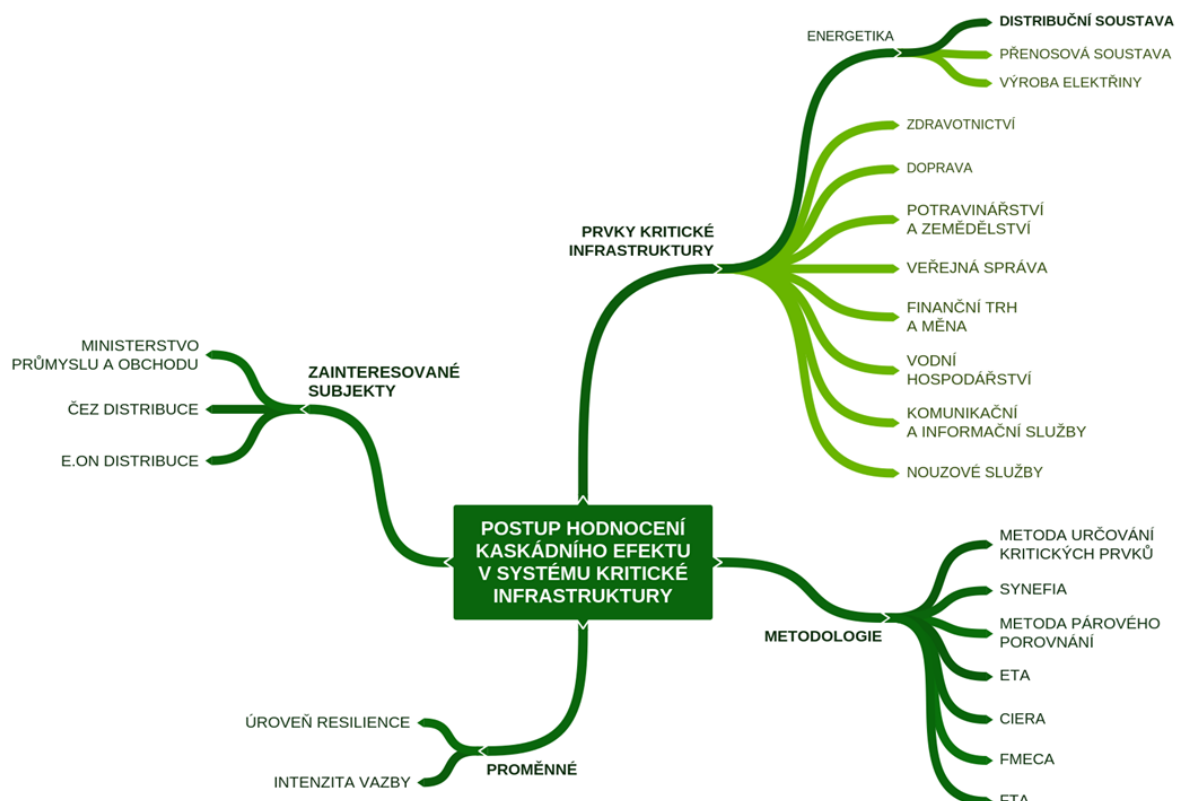
## 4 Návrh postupu hodnocení kaskádního efektu v systému kritické infrastruktury

Stěžejní část práce představuje postup hodnocení kaskádního efektu, který byl vytvořen na základě provedeného teoretického rozboru a analýzy řešené problematiky. V návaznosti na provedenou deskripci DS elektrické energie byly v rámci analytické části práce určeny prvky této soustavy, které mohou být na území České republiky ohroženy působením nežádoucích událostí a tím zapříčinit vznik řady dopadů. Dále byly určeny kritické prvky DS elektrické energie včetně analýzy existence vazeb uvnitř tohoto posuzovaného subsystému, v této návaznosti byly určeny a následně analyzovány taktéž kritické prvky železniční infrastruktury, jak uvnitř posuzovaného subsystému, tak i jako subsystémy navzájem. Součástí analytické části práce je taktéž analýza faktorů ovlivňující charakter šíření a úrovně intenzity kaskádního efektu. Toto představuje základ pro tvorbu postupu hodnocení kaskádního efektu, prostřednictvím kterého lze minimalizovat potenciální dopady narušení elektroenergetické kritické infrastruktury na společnost.

Postup hodnocení kaskádního efektu je navržen obecnou formou, čímž se stává využitelným nejen pro oblast elektroenergetiky, ale také pro další odvětví kritické infrastruktury zejména technického charakteru. Hodnocení je realizováno z makroskopického pohledu, tzn., že jsou zkoumány ucelené komponenty systému bez ohledu na jejich detailní strukturu. Současně v průběhu hodnocení kaskádních efektů není uvažováno kritérium N-1, které je považováno za velmi významné opatření pro omezení dopadů výpadků vybraného síťového uzlu.

### 4.1 Rámec hodnocení kaskádního efektu

Na základě provedené rešerše v návaznosti na analýzu stávajících přístupů k hodnocení kaskádního efektu jsou dále prezentována východiska návrhu pro tvorbu postupu hodnocení kaskádních efektů v systému kritické infrastruktury. Mnoho zdrojů, zejména zahraničních, poskytuje nástin či nové možnosti hodnocení kaskádních efektů v souvislosti s problematikou kritické infrastruktury. Hodnocení kaskádního efektu v systému kritické infrastruktury představuje složitý proces, který si vyžaduje jasně definovaný rámec. Tento rámec tvoří čtyři základní komponenty, kterými jsou (1) prvky kritické infrastruktury, (2) metodologie, (3) proměnné a (4) zainteresované subjekty (viz obrázek 1). Všechny tyto komponenty jsou nedílnou součástí hodnocení kaskádních efektů v systému kritické infrastruktury.



Obrázek 1: Rámec hodnocení kaskádního efektu

Pro vytvoření funkčního postupu pro hodnocení kaskádního efektu je nutné v první řadě identifikovat hodnocený systém nebo subsystém. Tedy **prvky kritické infrastruktury**, prostřednictvím kterých bude hodnocení realizováno. Z důvodu omezení práce je pozornost věnována zejména prvkům v souvislosti s DS elektrické energie, kde je také předpokládán vznik iniciační události, která je spouštěcím mechanismem pro vznik kaskádního efektu. Pro znázornění existence vazeb taktéž napříč několika subsystémy bude pozornost věnována oblasti železniční dopravy, tedy v návaznosti na omezení práce na železniční infrastrukturu, protože ta představuje základ železniční dopravy. Postup hodnocení bude navrhován pro všechny typy prvků v kontextu jejich topologie (Řehák et al., 2018), tzn. pro prvky bodové (např. transformační stanice nebo dispečerské pracoviště), liniové (např. elektrické vedení) a plošné (např. elektrická nebo rozvodná stanice).

Problematika zkoumání kaskádních efektů a jejich hodnocení musí vycházet z vhodné zvolené **metodologie**. Pro účely disertační práce byly primárně využity metody zaměřené na určování kritických prvků (Slivková, 2018) v jejichž návaznosti byla využita metoda párového srovnání (David, 1988) doplněna o poznatky z metodiky hodnocení synergických efektů SYNEFIA (Řehák et al., 2016a), čímž byla analyzována existence vazeb mezi prvky včetně určení jejich druhu. Při znázornění strukturální mapy šíření kaskádního efektu byla využita metody ETA (ČSN EN 62502, 2011), prostřednictvím které lze identifikovat možné důsledky vzniklé iniciační události. V souvislosti se stanovením úrovně resilience prvků, byla využita metoda CIERA

(Řehák et al., 2017). V rámci vyhodnocení úrovně rizika šíření kaskádního efektu byla využita metoda FMECA (ČSN EN 60812, 2007) a to v souvislosti s rozdělením úrovní šíření kaskádního efektu a stanovení referenčních hodnot, na základě kterých je možné hodnotit. Při vyhodnocení může být nad rámec využita také metoda FTA (ČSN EN 61025, 2007), prostřednictvím které lze identifikovat podmínky a faktory, jenž svou povahou mohou přispět ke vzniku iniciační události, a tyto informace zužitkovat při implementaci příslušných bezpečnostních opatření.

Nezbytnou součástí správného nastavení procesu hodnocení jsou **proměnné**, které lze pro potřeby disertační práce členit na proměnné související s hodnocením resilience a související s hodnocením vazeb. Proměnné determinující resilienci jsou rozloženy do tří základních komponent, kterými jsou robustnost, obnovitelnost a adaptabilita (Řehák et al., 2018). Oproti tomu základními proměnnými determinující intenzitu vazby jsou typ vazby, stav vazby, její úroveň, substituce vazby, časová charakteristika vazby či struktura vazby (Brabcová et al., 2018).

Pro postup hodnocení jsou důležité **zainteresované subjekty**, které do něj vstupují. Každý subjekt má svůj specifický požadavek na hodnocený subsystém. Jedná se zejména o společnosti ČEZ Distribuce, a.s. a E.ON Distribuce, a.s., které představují největší distributory elektřiny na území České republiky a především Ministerstvo průmyslu a obchodu, které je gestorem celého odvětví energetiky.

Všechny výše zmíněné aspekty představují důležitou roli pro vytvoření postupu hodnocení kaskádního efektu.

## 4.2 Postup hodnocení kaskádního efektu

Základním stavebním kamenem pro hodnocení kaskádních efektů je postup, který představuje soubor činností, jež je nutné realizovat v příslušné posloupnosti s cílem stanovit předpokládaný směr a intenzitu šíření kaskádních dopadů. Navržený postup prezentovaný obrázkem 2 je určen pro potřeby subjektů kritické infrastruktury a zainteresovaných orgánů státní správy a samosprávy.



Obrázek 2: Postup hodnocení kaskádního efektu

### Krok 1: Vymezení hodnoceného území

V prvním kroku provede hodnotitel vymezení hodnoceného území. Zvoleným územím může být např. obec, ORP nebo kraj. V tomto území budou následně vybírány prvky k dalšímu hodnocení.

### Krok 2: Výběr iniciačního prvku

Druhým krokem navrhovaného procesu je definování iniciační události, na jejímž základě bude proveden výběr tzv. iniciačního prvku, u kterého chce hodnotitel realizovat posouzení možnosti šíření kaskádního efektu. Tedy porucha tohoto iniciačního prvku může představovat spouštěcí mechanismus pro vznik kaskádního efektu. Hodnotitel vybírá iniciační prvek na základě vhodně zvolených metod. Např. v oblasti dopravy může být k tomuto účelu použita Metoda hodnocení kritických prvků v dopravě (Dvořák et al., 2017), v oblasti železniční dopravy může být použita metoda RICA Tool (Slivková, 2018), v oblasti vodního hospodářství, konkrétně kanalizačních sítí (Meijer et al., 2018) či vodovodních sítí (Aydin, 2018), pro oblast ICT (ENISA, 2014) a řada dalších. V případě subsystému distribuční soustavy elektrické energie může být takovýmto prvkem např. technický dispečink nebo elektrická stanice distribuční soustavy či vedení o napětí 110 kV apod.

**Krok 3: Výběr dependentního subsystému**

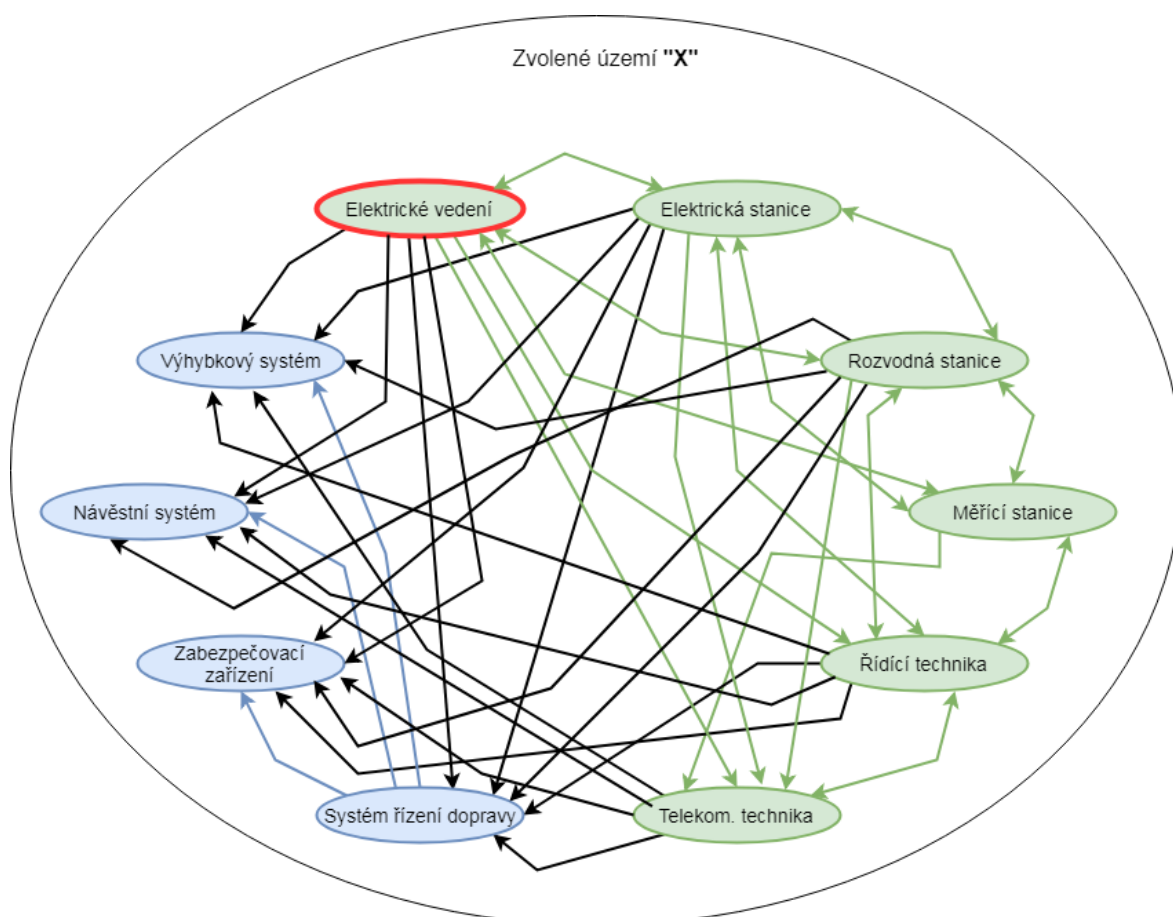
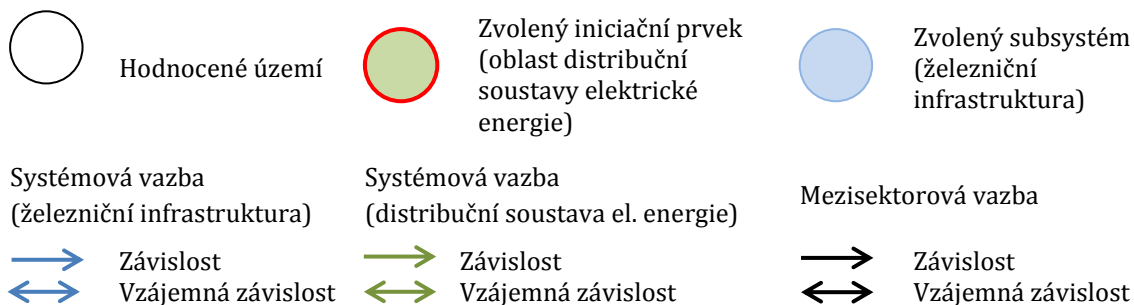
V návaznosti na krok 2 je důležité provést výběr subsystému technického charakteru, který se nachází v rámci zvoleného území, vůči kterému bude iniciační prvek hodnocen v souvislosti s možností šíření kaskádního efektu. Těmito subsystémy mohou být technické infrastruktury, tj. energetika, doprava, vodní hospodářství a komunikační a informační systémy, obdobně jako tomu je u kritické infrastruktury ([Nařízením vlády 432, 2010](#)). Příkladem dependentních subsystémů může být odvětví dopravy, popř. s konkrétním zaměřením na dopravu silniční, železniční, leteckou nebo vnitrozemskou vodní.

**Krok 4: Výběr dependentních prvků**

Poté co hodnotitel provede výběr dependentního subsystému, musí být v rámci tohoto subsystému identifikovány konkrétní prvky, u kterých bude hodnoceno šíření kaskádního efektu. Výběr dependentních prvků lze provést na základě vhodně zvolených metod obdobně, jako tomu bylo při výběru iniciačního prvku v kroku 2.

**Krok 5: Vytvoření strukturální mapy šíření kaskádního efektu**

Dalším krokem je tvorba strukturální mapy šíření kaskádního efektu mezi vybranými prvky kritické infrastruktury ve vymezeném území. V tomto kroku je možné využít metodu ETA ([ČSN EN 62502, 2011](#)), která je založena na rozboru událostí vedoucích k potenciální nehodě. Hodnotitel si během hodnocení klade otázku „Co se stane, když ...“ a postupně tímto hledá možné události, které mohou vzniknout v návaznosti na iniciační událost. Na základě principu této metody lze graficky znázornit události, které mohou vzniknout v návaznosti na iniciační událost. Vzniklá strukturální mapa, která graficky znázorňuje jednotlivé prvky a vazby (tj. vzájemná závislost a závislost), které jsou mezi nimi předpokládány, viz obrázek 3. V případě, že v následujícím kroku není žádná z těchto vazeb prokázána, riziko kaskádního efektu je nulové, neboť identifikované prvky spolu nesouvisí (např. závislost funkce dispečerského pracoviště DS elektrické energie na živočišné výrobě, konkrétně chovu prasat) a hodnocení tak může být ukončeno.

**Legenda:**

Obrázek 3: Obecné znázornění strukturální mapy šíření kaskádních efektů

**Krok 6: Stanovení intenzity vazby posuzovaných prvků**

U prvků, mezi kterými byla identifikována vazba (viz krok 5), následuje stanovení intenzity této vazby, a to nejen mezi iniciačním a dependentním prvkem, ale také mezi dependentními prvky navzájem. V tomto kroku provede hodnotitel výpočet založený na hodnocení vazby pomocí následujících kritérií:

- typ vazby (tj. fyzická, geoprostorová nebo kybernetická a logická);
- stav vazby (tj. vzájemná závislost, závislost a vliv);
- úroveň vazby (tj. systémová, sektorová a subsektorová);
- substituce vazby (tj. neexistuje žádná substituční vazba, existuje pouze 1 substituční vazba, existuje 2 a více možných substitučních vazeb);

- časová charakteristika vazby (tj. nepřetržitá, periodická, pohotovostní);
- struktura vazby (přímá, nepřímá přes 1 uzel, nepřímá přes 2 a více uzlů).

Bližší specifikace jednotlivých kritérií, jejich bodové hodnoty a vztah pro stanovení intenzity vazby mezi prvky jsou popsány v kapitole 4.3.1.

### **Krok 7: Stanovení úrovně resilience posuzovaných prvků**

Následně hodnotitel provede stanovení úrovně resilience posuzovaných prvků, tj. iniciačního a všech dependentních. K tomuto účelu je doporučováno využít metodu CIERA (Řehák et al., 2018), která umožňuje integrované hodnocení robustnosti, obnovitelnosti a adaptability těchto prvků. Bližší specifikace jednotlivých kritérií, jejich bodové hodnoty a vztah pro stanovení úrovně resilience prvků jsou popsány v kapitole 4.3.2.

### **Krok 8: Stanovení úrovně rizika šíření kaskádního efektu**

Předposledním krokem procesu je stanovení úrovně rizika šíření kaskádního efektu. Tato hodnota vychází z intenzity vazby mezi hodnocenými prvky, která determinuje pravděpodobnost šíření kaskádního efektu a z úrovně resilience hodnocených prvků, které determinují závažnost dopadu v případě šíření kaskádního efektu. Riziko šíření kaskádních dopadů lze vypočítat podle vzorce (1):

$$R = \sqrt[3]{Z_{IP} \cdot Z_{DP} \cdot IV} = \sqrt[3]{(1 - RE_{IP}) \cdot (1 - RE_{DP}) \cdot IV} \quad (1)$$

kde  $R$  = úroveň rizika šíření kaskádního efektu z influentního prvku (IP) na dependentní prvek (DP) [%];  $Z_{IP}$  = zranitelnost influentního prvku [%];  $Z_{DP}$  = zranitelnost dependentního prvku [%];  $IV$  = intenzita vazby mezi influentním a dependentním prvkem [%];  $RE_{IP}$  = úroveň resilience influentního prvku [%];  $RE_{DP}$  = úroveň resilience dependentního prvku [%].

### **Krok 9: Vyhodnocení šíření kaskádního efektu**

Na základě stanovení úrovně rizika šíření kaskádních efektů mezi jednotlivými prvky provede hodnotitel závěrečné vyhodnocení, zda a s jakou intenzitou dochází mezi těmito prvky k šíření kaskádního efektu. Tyto hodnoty následně zanesou do strukturální mapy jako podklad pro navazující proces minimalizace rizik šíření kaskádních efektů, který by měl být založený především na implementaci adekvátních bezpečnostních opatření zvyšujících úroveň resilience dotčených prvků.

Pro vyhodnocení míry šíření kaskádního efektu využije hodnotitel tabulku 1, která je založena na komparaci dosažených hodnot úrovně rizika šíření kaskádního efektu. Úroveň šíření kaskádního efektu je prostřednictvím stanovených intervalů členěna do čtyř kategorií, tj. kritická, vysoká, akceptovatelná a nízká úroveň rizika šíření kaskádního efektu.



Tabulka 1: Referenční hodnoty pro hodnocení úrovně šíření kaskádního efektu

Interval	Úroveň šíření kaskádního efektu	
(81; 100)	I. kategorie	Kritická úroveň rizika šíření kaskádních dopadů. Důsledkem takového kaskádního dopadu může být selhání dependentního prvku.
(62; 81)	II. kategorie	Vysoká úroveň rizika šíření kaskádních dopadů. Důsledkem takového kaskádního dopadu může být významné narušení funkce dependentního prvku.
(43; 62)	III. kategorie	Akceptovatelná úroveň rizika šíření kaskádních dopadů. Důsledkem takového kaskádního dopadu může být částečné narušení nebo omezení funkce dependentního prvku.
(0; 43)	IV. kategorie	Nízká úroveň rizika šíření kaskádních dopadů. Důsledkem takového kaskádního dopadu nedojde k narušení ani omezení funkce dependentního prvku.

Rozdělení úrovní šíření kaskádního efektu a stanovení referenčních hodnot filozoficky vychází z metody Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (ČSN EN 60812, 2007), která při stanovování míry rizika pracuje s více proměnnými a při hodnocení stavů vychází z variací jejich extrémních hodnot. Obdobným způsobem byly stanoveny jednotlivé úrovně kritičnosti, které zohledňují variace extrémních hodnot u čtyřstupňové hodnotící škály, obdobně jako tomu je v případě hodnocení kritičnosti prvků železniční infrastruktury (Slivková, 2018):

- 1,1,1,4 =>  $\varnothing$  1,75 => 43,7 %
- 1,1,4,4 =>  $\varnothing$  2,50 => 62,5 %
- 1,4,4,4 =>  $\varnothing$  3,25 => 81,3 %
- 4,4,4,4 =>  $\varnothing$  4,00 => 100 %

Pozornost by měla být následně věnována I. a II. kategorii úrovně šíření kaskádního efektu, zde by měla být zavedená adekvátní bezpečnostních opatření. Konkrétně by se mělo jednat o stanovení a implementaci adekvátních bezpečnostních opatření pro zajištění připravenosti či zvýšení resilience určených prvků (např. Řehak et al., 2018; Stoller et al., 2018; Klein a Hutter, 2017; Labaka et al., 2015; Hromada a Lukas, 2012; Dvorak et al., 2013).

V tomto kroku je možné nad rámec využít metodu FTA (ČSN EN 61025, 2007). Touto metodou může hodnotitel identifikovat podmínky a faktory, které svou povahou mohly přispět ke vzniku iniciační události a tyto informace taktéž využít v souvislosti se zavedením bezpečnostních opatření.

### 4.3 Kritéria hodnocení kaskádního efektu

V rámci postupu hodnocení kaskádního efektu představuje důležitou část stanovení intenzity vazby a úrovně resilience. Prostřednictvím jejich kombinace je možné následně stanovit úroveň rizika šíření kaskádního efektu. V této fázi postupu hodnocení sehrávají



důležitou roli kritéria, prostřednictvím kterých je možné hodnotit zmíněnou intenzitu vazby a úroveň resilience. V návaznosti na výše prezentovaný postup hodnocení kaskádního efektu je následující text věnován detailnímu rozpracování kritérií v souvislosti s intenzitou vazby a úrovní resilience.

#### 4.3.1 Kritéria hodnocení intenzity vazby

Intenzita vazby představuje významný prvek pro určování rychlosti a způsobu šíření dopadů mezi jednotlivými prvky (Řehák et al., 2016b). V rámci disertační práce (kapitola 2.2.2) byly prezentovány různé proměnné, prostřednictvím kterých lze charakterizovat vazbu, jak uvádí např. Rinaldi et al. (2001), Řehák et al. (2016a), Zimmerman a Restrepo (2009), Dudenhoeffear et al. (2006), Setola a Theocharidou (2016), Bühne et al. (2003). Na základě komparační analýzy byly z výše uvedených zdrojů vybrány nejvhodnější proměnné, prostřednictvím kterých lze hodnotit intenzitu vazby mezi influentními popř. iniciačními a dependentními kritickými prvky. Jedná se o:

- typ vazby,
- stav vazby,
- úroveň vazby,
- časová charakteristika vazby,
- substituce vazby a
- struktura vazby.

Na základě hodnocení intenzity vazby podle **typu vazby**, lze vazbu členit na fyzickou, geoprostorovou nebo kybernetickou a logickou. Fyzická vazba je dána svým skutečným propojením prvků, kdy příkladem by mohlo být propojení prostřednictvím kabelového spojení. Geoprostorová vazba představuje vazbu prostřednictvím své lokace, naopak kybernetickou vazbu si lze představit jako propojení skrz informace přenášené prostřednictvím informační infrastruktury. Vazby mezi dvěma infrastrukturami, které svým vztahem závisí na stavu druhé prostřednictvím mechanismu, který není fyzickým, kybernetickým ani geografickým spojením představuje logickou vazbu. (Rinaldi et al., 2001)

**Stav vazby** v rámci hodnocení intenzity vazby lze rozdělit na vzájemnou závislost, která představuje obousměrný vztah mezi dvěma infrastrukturami, díky němuž stav každé infrastruktury ovlivňuje nebo je korelován se stavem druhé. Obecně řečeno, dvě infrastruktury jsou vzájemně závislé, je-li každá z nich závislá na druhé. Závislost je charakteristická svým propojením nebo spojením mezi dvěma infrastrukturami, přes které je stav jedné infrastruktury ovlivňován nebo korelován stavem druhé. Naopak vliv je dán svým jednosměrným vztahem. Spojení mezi dvěma infrastrukturami, přes které je stav jedné infrastruktury ovlivňován druhou. (Rinaldi et al., 2001; Setola a Theocharidou, 2016)

Hodnocení intenzity vazby na základě **úrovně vazby** lze členit na systémovou, sektorovou a nebo subsektorovou vazbu. Systémová vazba je charakteristická svým

propojením prostřednictvím celého systému kritické infrastruktury, sektorová vazba je dána vztahem jednotlivých sektorů mezi sebou, naopak subsektorová vazba představuje vztahy uvnitř daného sektoru.

Intenzita vazby se dále hodnotí podle **substituce** vazby. Nejvýše hodnocena bude vazba v rámci vztahu mezi dvěma infrastrukturami, kde neexistuje žádná substituční vazba, tedy se prokáže, že daná vazba nemůže být nahrazenou jinou vazbou. Dalším případem je existence pouze 1 substituční vazby. Klasickým příkladem takové vazby může být náhradní zdroj elektrické energie. Pokud ve vazbě existuje 2 a více možných substitučních vazeb je hodnocena.

Z pohledu **časové charakteristiky vazby** lze hodnotit intenzitu vazby na nepřetržitou, periodickou a pohotovostní. Za předpokladu, že vazba mezi dvěma infrastrukturami vyžaduje pro svou plnohodnotnou funkci nepřetržitě propojení, jedná se o nepřetržitou vazbu. Oproti tomu vazba založená na opakování se v pravidelných intervalech představuje periodickou vazbu. Pohotovostní vazba je dána svým vztahem pouze v mimořádném případě či v situacích na vyžádání, tedy prvotně se vůbec neprojevuje.

**Strukturu** vazby v rámci hodnocení intenzity vazby lze rozdělovat vazbu přímou, nepřímou přes 1 uzel a nepřímou přes 2 a více uzlů. Přímá vazba reprezentuje vztah založený na bezprostředním provázání. V případě vazeb, kdy dochází k propojení přes jeden prvek, jedná se o nepřímou vazbu přes 1 uzel, v případě, že je vazba založena na propojení přes 2 a více prvků, jedná se o nepřímou vazbu přes 2 a více uzlů.

Bodové ohodnocení jednotlivých proměnných determinujících druh vazby bylo provedeno s využitím metody analýzy párového srovnání (David, 1988). V této návaznosti bylo vytvořeno hodnocení na základě hrubého rozlišení, tzn., že tyto proměnné jsou hodnoceny pouze prostřednictvím bodového rozsahu 1-3, kdy hodnota 3 znamená nevyšší možnou důležitost a hodnota 1 naopak nejnížší důležitost (viz tabulky 2-7).

Tabulka 2: Párové srovnání proměnných determinujících typ vazby

	Fyzická	Logická	Geoprostorová	Kybernetická	$\Sigma$	Přiřazené bodové hodnocení
Fyzická		1	1	1	3	3
Logická	0		0	0	0	1
Geoprostorová	0	1		0	1	2
Kybernetická	0	1	1		2	2

Tabulka 3: Párové srovnání proměnných determinujících stav vazby

	Vzájemná závislost	Závislost	Vliv	$\Sigma$	Přiřazené bodové hodnocení
Vzájemná závislost		1	1	2	3
Závislost	0		1	1	2
Vliv	0	0		0	1

Tabulka 4: Párové srovnání proměnných determinujících úroveň vazby

	Systémová vazba	Sektorová vazba	Subsektorová vazba	$\Sigma$	Přiřazené bodové hodnocení
Systémová vazba		1	1	2	3
Sektorová vazba	0		1	1	2
Subsektorová vazba	0	0		0	1

Tabulka 5: Párové srovnání proměnných determinujících substituci vazby

	Neexistuje žádná substituční vazba	Existuje pouze 1 substituční vazba	Existuje 2 a více možných substitučních vazeb	$\Sigma$	Přiřazené bodové hodnocení
Neexistuje žádná substituční vazba		1	1	2	3
Existuje pouze 1 substituční vazba	0		1	1	2
Existuje 2 a více možných substitučních vazeb	0	0		0	1

Tabulka 6: Párové srovnání proměnných determinujících časovou charakteristiku vazby

	Nepřetržitá vazba	Periodická vazba	Pohotovostní vazba	$\Sigma$	Přiřazené bodové hodnocení
Nepřetržitá vazba		1	1	2	3
Periodická vazba	0		1	1	2
Pohotovostní vazba	0	0		0	1

Tabulka 7: Párové srovnání proměnných determinující strukturu vazby

	Přímá vazba	Nepřímá vazba (přes 1 uzel)	Nepřímá vazba (přes 2 a více uzlů)	$\Sigma$	Přiřazené bodové hodnocení
<b>Přímá vazba</b>		1	1	2	3
<b>Nepřímá vazba (přes 1 uzel)</b>	0		1	1	2
<b>Nepřímá vazba (přes 2 a více uzlů)</b>	0	0		0	1

Celkový přehled proměnných pro hodnocení intenzity vazby včetně bodového hodnocení prezentuje tabulka 8.

Tabulka 8: Proměnné pro hodnocení intenzity vazby včetně jejich bodového hodnocení

Proměnné pro hodnocení intenzity vazby		Bodové hodnocení
Typ vazby	Fyzická vazba	3
	Geoprostorová vazba	2
	Kybernetická vazba	2
	Logická vazba	1
Stav vazby	Vzájemná závislost	3
	Závislost	2
	Vliv	1
Úroveň vazby	Systémová vazba	3
	Sektorová vazba	2
	Subsektorová vazba	1
Substituce vazby	Neexistuje žádná substituční vazba	3
	Existuje pouze 1 substituční vazba	2
	Existuje 2 a více možných substitučních vazeb	1
Časová charakteristika vazby	Nepřetržitá	3
	Periodická	2
	Pohotovostní	1
Struktura vazby	Přímá	3
	Nepřímá přes 1 uzel	2
	Nepřímá přes 2 a více uzlů	1

Proměnné uvedené v textu výše se však značně liší svou významností v průběhu hodnocení. Z tohoto důvodu bylo provedeno párové srovnání variant (David, 1988), prostřednictvím kterého byly následně určeny váhové koeficienty vazeb, viz tabulka 9.

Tabulka 9: Párové srovnání variant pro určení váhového koeficientu vazby

	Typ vazby	Stav vazby	Úroveň vazby	Substit. Vazby	Č. char. Vazby	Strukt. Vazby	$\Sigma$	$\Sigma+1$	w
Typ vazby		1	1	1	1	1	5	6	<b>29 %</b>
Stav vazby	0		1	1	1	1	4	5	<b>24 %</b>
Úroveň vazby	0	0		1	1	1	3	4	<b>19 %</b>
Substit. Vazby	0	0	0		1	1	2	3	<b>14 %</b>
Č. char. Vazby	0	0	0	0		1	1	2	<b>10 %</b>
Struk. Vazby	0	0	0	0	0		0	1	<b>4 %</b>
							$\Sigma=$	21	<b>100 %</b>

Legenda:  $\Sigma$  = suma, w = váhový koeficient

Na základě tohoto zjištění byly těmto proměnným přiřazeny váhové koeficienty s hodnotami uvedenými níže:

- typ vazby (0,29);
- stav vazby (0,19);
- úroveň vazby (0,24);
- časová charakteristika vazby (0,14);
- substituce (0,1);
- struktura vazby (0,04).

Intenzita vazby mezi prvky se stanovuje váženým průměrem podle vzorce (2):

$$IV = \sum_{i=1}^n (P_{IV_i} \cdot w) \cdot \frac{100 \%}{P_{IV_{max}}} \quad (2)$$

kde  $IV$  = intenzita vazby mezi influentním a dependentním prvkem [%];  $P_{IV}$  = hodnocená úroveň proměnných determinujících intenzitu vazby mezi prvky [číselná hodnota od 1 (tj. nejhorší možné hodnocení) do 3 (tj. nejlepší možné hodnocení)];  $n$  = počet proměnných intenzity vazby;  $w$  = váhy proměnných determinujících intenzitu vazby mezi prvky.

### 4.3.2 Kritéria hodnocení resilience

Kritéria pro hodnocení resilience lze členit do tří skupin, které vycházejí z proměnných, které resilienci utvářejí, tj. robustnost, obnovitelnost a adaptabilita (NIAC, 2009). Definice pojmů robustnosti, obnovitelnosti a adaptability jsou uvedeny v kapitole disertační práce 5.4.1. Na základě metody CIERA (Řehák et al., 2018) jsou prostřednictvím tabulky 10 tyto kritéria prezentována, a to skrz proměnné, které je utvářejí.

Tabulka 10: Kritéria hodnocení resilience a jejich proměnné (Řehák et al., 2018)

Kritérium	Proměnné
Robustnost prvku	Krizová připravenost
	Redundance
	Schopnost detekce
	Reakceschopnost
	Fyzická odolnost
Obnovitelnost prvku	Materiální zdroje
	Finanční zdroje
	Lidské zdroje
	Procesy obnovy
Adaptabilita prvku	Management rizik
	Inovační procesy
	Vzdělávací a rozvojové procesy

Úroveň resilience prvku kritické infrastruktury je vypočtena jako aritmetický průměr hodnot komponent, kterými je determinována (vzorec 3):

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i \quad (3)$$

kde  $RE$  = resilience prvku kritické infrastruktury [%];  $K$  = komponenty resilience prvku kritické infrastruktury, tj. robustnost, obnovitelnost a adaptabilita [%];  $n$  = celkový počet komponent determinujících resilienci.

Úrovně jednotlivých komponent resilience prvku kritické infrastruktury jsou stanovovány váženým průměrem svých proměnných (vzorec 4):

$$K_i = \sum_{j=1}^m P_j v_j \quad (4)$$

kde  $K_i$  = i-tá komponenta resilience prvku kritické infrastruktury [%];  $P_j$  = j-tá proměnná resilience prvku kritické infrastruktury [%];  $v_j$  = j-tá normalizovaná váha j-té proměnné resilience prvku kritické infrastruktury [ $\{0; 1\}$ ];  $m$  = celkový počet proměnných v i-té komponentě.

Úrovně proměnných resilience prvku kritické infrastruktury jsou stanovovány váženým průměrem jednotlivých měřitelných položek (vzorec 4). Jelikož je úroveň měřitelných položek vyjadřována bodovým hodnocením, je třeba ve vzorci 5 provést procentuální transformaci pro převod pěti stupňové škály na procentuální body, tj. vynásobení vzorce hodnotou 20.

$$P_j = 20 \sum_{k=1}^l MP_k w_k \quad (5)$$

kde  $P_j$  = j-tá proměnná resilience prvku kritické infrastruktury [%];  $MP_k$  = k-tá měřitelná položka resilience prvku kritické infrastruktury [počet bodů];  $w_k$  = k-tá normalizovaná váha k-té měřitelné položky resilience prvku kritické infrastruktury [ $\{0; 1\}$ ];  $l$  = celkový počet měřitelných položek v j-té proměnné.

Na základě výše uvedených vztahů (vzorce 3 - 5) lze souhrnný vzorec pro výpočet úrovně resilience prvku kritické infrastruktury definovat následovně (vzorec 6):

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m 20 v_j \sum_{k=1}^l MP_k w_k \quad (6)$$

kde  $RE$  = resilience prvku kritické infrastruktury [%];  $n$  = celkový počet komponent determinujících resilienci;  $v_j$  = j-tá normalizovaná váha j-té proměnné resilience prvku kritické infrastruktury [ $\{0; 1\}$ ];  $m$  = celkový počet proměnných v i-té komponentě;  $MP_k$  = k-tá měřitelná položka resilience prvku kritické infrastruktury [počet bodů];  $w_k$  = k-tá normalizovaná váha k-té měřitelné položky resilience prvku kritické infrastruktury [ $\{0; 1\}$ ];  $l$  = celkový počet měřitelných položek v j-té proměnné.

## **Závěr**

Elektroenergetika svým charakterem představuje v rámci kritické infrastruktury jedinečné pododvětví. Důvodem je fakt, že se svou funkcí výrazně podílí na fungování řady dalších subsystémů kritické infrastruktury. Z důvodu rozsahu systému elektroenergetiky byla práce primárně zaměřena na distribuční soustavu elektrické energie, jejímiž největšími provozovateli na území České republiky jsou společnosti ČEZ Distribuce, a.s. a E.ON Distribuce, a.s.

V souvislosti s působením nežádoucích událostí na subsystém elektroenergetiky lze předpokládat vznik dopadů prostřednictvím narušení funkce tohoto pododvětví včetně jeho dependentních subsystémů. Šíření těchto dopadů výrazně ovlivňují faktory jako je resilience prvků kritické infrastruktury a charakter vazby, který určuje směr a intenzitu šíření. Znalost směru šíření dopadů v kombinaci s jejich intenzitou a úrovní jejich resilience může vést na základě predikce k minimalizaci dopadů, neboť budou identifikována slabá místa s primární potřebou realizace bezpečnostních opatření.

Na základě neexistence postupu systémového hodnocení kaskádního efektu v systému kritické infrastruktury v České republice a potřebě zajištění ochrany kritické infrastruktury přináší předkládaná práce základní pohled do zkoumané problematiky a prezentuje návrh postupu pro hodnocení kaskádního efektu v systému kritické infrastruktury.

V této souvislosti je analytická část práce zaměřena mimo jiné na posuzování nežádoucích událostí, které mohou svým působením zapříčinit selhání prvků distribuční soustavy elektrické energie. Následně byla provedena identifikace kritických prvků distribuční soustavy elektrické energie a kritických prvků železniční infrastruktury, prostřednictvím nichž je možné posoudit existenci vazeb. Analytická část práce je dále zaměřena na přehled současných přístupů k hodnocení kaskádního efektu, na jejímž základě lze konstatovat neexistenci postupu pro hodnocení kaskádního efektu v kombinaci s posouzením resilience prvků.

Stěžejní část práce je zaměřena na samotný návrh procesu hodnocení kaskádního efektu v systému kritické infrastruktury. Východiskem při jeho tvoření bylo definování rámce pro hodnocení kaskádního efektu. Prezentovaný postup hodnocení je navržen obecnou formou, čímž se stává využitelným nejen pro oblast elektroenergetiky, ale také pro další odvětví kritické infrastruktury zejména technického charakteru. Proces sestává z devíti kroků, které spočívají ve vymezení hodnoceného území, výběru iniciačního prvku společně s výběrem dependentního subsystému a dependentních prvků. V této návaznosti je možné na základě analýzy závislostí mezi těmito posuzovanými prvky vytvořit tzv. strukturální mapu kaskádního efektu. Jedná se o grafické znázornění existence vazeb, prostřednictvím kterých může dojít k šíření dopadů (tj. kaskádní efekt). Pro vyhodnocení šíření kaskádního efektu je nezbytné provést stanovení úrovně šíření



kaskádního efektu, které je možné uskutečnit na základě stanovení intenzity vazby a úrovně resilience posuzovaných prvků. Prostřednictvím vyhodnocení šíření kaskádního efektu získá hodnotitel informace, které mohou být následně využity v souvislosti s prioritizací prvků z pohledu nutnosti stanovení bezpečnostních opatření a jejich následnou implementací, například pro zajištění připravenosti či zvýšení resilience určených prvků.

Závěrem lze prezentovat následující přínosy práce. Ty lze v souvislosti s praxí spatřovat ve vytvoření postupu hodnocení kaskádního efektu v systému kritické infrastruktury, který je určen pro potřeby subjektů kritické infrastruktury a zainteresovaných orgánů státní správy a samosprávy. V této oblasti lze rovněž očekávat tzv. společenský přínos spočívající v minimalizaci potenciálních dopadů narušení elektroenergetické kritické infrastruktury na společnost. Přínos pro vědní obor lze spatřovat zejména v rozšíření rámce současného přístupu k hodnocení dopadů v systému kritické infrastruktury. Teoretický přínos spočívá v definování postupu vyhodnocování kaskádního efektu v systému kritické infrastruktury.

## Výběr bibliografických zdrojů

- Aydin, N. 2018. Identifying Critical Components in Water Networks Using Time-Dependent Data. In *13th International Conference on Hydroinformatics*, Italy. 6 p. DOI: 10.29007/pjhc
- Bie, W., Wang, X. 2002. Evaluation of Power System Cascading Outages. In *IEEE PowerCon 2002: International Conference on Power System Technology Proceedings*, Kunming, China, 2002, pp. 415-419. ISBN 0-7803-7459-2. DOI: 10.1109/ICPST.2002.1053577
- Brabcová, V., Řehák, D., Slivková, S., Onderková, V., Nešporová, V. 2017. *Příloha č. 1 Závěrečné zprávy projektu SP2017/87 - Hodnocení souvztažností v systému kritické infrastruktury*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, 2017. 116 s.
- Bühne, S., Halmans, G., Pohl, K. 2003. Modeling Dependencies between Variation Points in Use Case Diagrams. In *REFSQ'03*, 2003. pp. 59–69.
- ČSN EN 60812 (010675), 2007. *Techniky analýzy bezporuchovosti systémů - Postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA)*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007. 44 s.
- ČSN EN 61025 (010276), 2007. *Analýza stromu poruchových stavů (FTA)*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007. 48 s.
- ČSN EN 62502 (010676), 2011. *Techniky analýzy spolehlivosti - Analýza stromu událostí (ETA)*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 44 s.
- David, H.A. 1988. *The Method of Paired Comparisons*. Hodder Arnold: London. 200 p. ISBN 978-0852642900.
- Dudenhoefter, D.D., Permann, M.R., Manic, M. 2006. CIMS: A Framework for Infrastructure Interdependency Modeling and Analysis. In *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, 2006. 9 p.
- Dvořák, Z., Sventeková, E., Řehák, D. and Cekerevac, Z. 2017. Assessment of Critical Infrastructure Elements in Transport', *Procedia Engineering*, Vol. 187, pp. 548-555. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.413
- ENISA. 2014. *Methodologies for the identification of Critical Information Infrastructure assets and services*. ENISA: Heraklion, Greece. 43 p. ISBN 978-92-9204-106-9, DOI: 10.2824/38100
- Gonzva, M., Barroca, B., Gautier, P.E., Diab Y. 2016 Analysis of disruptions cascade effect within and between urban sociotechnical systems in a context of risks. In *3rd European Conference on Flood Risk Management*, 2016. 9 p. DOI: 10.1051/e3sconf/20160707008
- Hassel, H., Johansson, J., Svegrup, L., Arvidsson, B. 2014. Method to study cascading effects. In: *Modelling of dependencies and cascading effects for emergency management in crisis situations*. 40 p.

- Hromada, M., Lukas, L. 2012. *Multicriterial Evaluation of Critical Infrastructure Element Protection in Czech Republic*. In International Conferences ASEA and DRBC 2012, pp. 361-368. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Klein, P., Hutter, R. 2017. Qualitative Criteria in the Assessment of Security Measures for Critical Infrastructure Protection: A New Approach. *International Journal of Critical Infrastructures*, 13(1): 29-45. DOI: 10.1504/IJCIS.2017.083637
- Labaka, L., Hernantes, J., Sarriegi, J. M. 2015. A framework to improve the resilience of critical infrastructures. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, Vol. 6, Iss. 4, pp. 409-423. DOI: 10.1108/IJDRBE-07-2014-0048
- Massive blackout hits Caracas. 2018. [online]. Xinhuanet.com. [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: [http://www.xinhuanet.com/english/2018-08/01/c\\_137361063.htm](http://www.xinhuanet.com/english/2018-08/01/c_137361063.htm)
- Meijer, D., Bijnen, van M., Langeveld, J., Korving, J., Post, J., Clemens F. 2017. Identifying Critical Elements in Sewer Networks Using Graph-Theory. *Water* Vol. 10, Iss: 2 No. 136. DOI: 10.3390/w10020136
- Nařízení vlády č. 432 ze dne 22. prosince 2010 o kritériích pro určení prvku kritické infrastruktury, v aktuálním znění.
- NIAC. 2009. *Critical Infrastructure Resilience Final Report and Recommendations*. 2009. Washington, D.C.: U.S. Department of Homeland Security
- Pederson, P., Dudenhoeffer, D., Hartley, S., Permann, M. 2006. *Critical Infrastructure Interdependency Modeling: A Survey of U.S. and International Research*. Idaho: Idaho National Laboratory, 2006. 126 p.
- Rada Evropské unie. 2008. Směrnice Rady 2008/114/ES ze dne 8. prosince 2008 o určování a označování evropských kritických infrastruktur a o posouzení potřeby zvýšit jejich ochranu. 8 s.
- Renger, R., Foltysová, J., Ienuso, S., Renger, J., Booze, W. 2017. Evaluating system cascading failures. *Evaluation Journal of Australasia*, 2017, Vol. 17, Iss 2, pp 29-36. ISSN 1035-719X. DOI: 10.1177/1035719X1701700205
- Rinaldi, S.M., Peerenboom, J.P., Kelly, T.K. 2001. Identifying, Understanding, and Analyzing Critical infrastructure interdependencies. In: *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 21(6), pp. 11-25.
- Řehák, D., Markuci, J., Hromada, M., Barčová, K. 2016a. Quantitative evaluation of the synergistic effects of failures in a critical infrastructure system. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, Vol. 14, pp. 3-17. ISSN 1874-5482. DOI: 10.1016/j.ijcip.2016.06.002
- Řehák, D., Šenovský, P., Hromada, M., Pidhaniuk, L., Dvořák, Z., Loveček, T., Ristvej, J., Leitner, B., Sventeková, E., Maris, L. 2018. *Metodika hodnocení resilience prvků kritické infrastruktury*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2018. 90 s. ISBN 978-80-248-4164-9.

- Řehák, D., Šenovský, P., Hromada, M., Pidhaniuk, L., Dvořák, Z., Loveček, T., Ristvej, J., Leitner, B., Sventeková, E., Maris, L. 2018. *Metodika hodnocení resilience prvků kritické infrastruktury*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2018. 90 s. ISBN 978-80-248-4164-9.
- Setola, R., Theocharidou, M. 2016. *Modelling Dependencies between Critical Infrastructures. Chapter in Managing the Complexity of Critical Infrastructures. A Modelling and Simulation Approach*. Springer Open, 2016, pp. 19-42. DOI: 10.1007/978-3-319-51043-9\_2
- Slivková, S. 2018. *Určování kritických prvků v oblasti železniční dopravy*. [Disertační práce]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství.
- Stoller, J., Dvorak, P., Turo, T., Zedulova, E. 2018. Basic Principles of Critical Infrastructure Protection. In *22nd International Scientific Conference "Transport Means 2018"*, pp. 267-271. Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology.
- Zákon č. 240 ze dne 28. června 2000 o krizovém řízení a o změně některých zákonů (krizový zákon), v aktuálním znění.
- Zimmerman, R., Restrepo, C.E. 2009. Analyzing cascading effects within infrastructure sectors for consequence reduction. In *IEEE Conference on Technologies for Homeland Security (HST'09)*, Boston, MA, 2009, pp. 165-170. ISBN 978-1-4244-4178-5. DOI: 10.1109/THS.2009.5168029
- Zuccaro, G., De Gregorio, D., Leone, M. F. 2018. Theoretical model for cascading effects analyses. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018. Vol. 30 (part B), pp. 199–215. ISSN: 2212-4209. DOI: 10.1016/j.ijdr.2018.04.019

## Publikační činnost

D<sub>WOS</sub> – ŘEHÁK, D., ONDERKOVÁ, V., BRABCOVÁ, V. Determinants of dynamic resilience modelling in critical infrastructure elements. In: *29th European Safety and Reliability Conference (ESREL)*, 2019, Hannover, Německo. (odeslán full text) [20 %]

J<sub>SC</sub> – BRABCOVÁ, V., SLIVKOVÁ, S., ŘEHÁK, D., TOSERONI, F., HAVKO, J. Assessing the Cascading Effect of Energy and Transport Critical Infrastructure Elements: Case Study. In *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*, 2018, Vol. 20, No. 2. ISSN 1335-4205. [30 %]

D<sub>WOS</sub> – ŘEHÁK, D., SLIVKOVÁ, S., BRABCOVÁ, V. Evaluation the resilience of critical infrastructure systems. In *Proceedings of the 27th European Safety and Reliability Conference (ESREL)*, 2017, Portorož, Slovinsko, pp. 955-962. ISBN 978-1-138-62937-0. [30 %]

D – BRABCOVÁ, V., ŘEHÁK, D. Tvorba procesních modelů vybraných opatření ochrany obyvatelstva. In *Sborník příspěvků z XVI. ročník mezinárodní konference Ochrana obyvatelstva – Nebezpečné látky 2017*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2017, s. 10-12. ISSN 1803-7372. [80 %]

D – BRABCOVÁ, V., ŘEHÁK, D. Zvýšení srozumitelnosti opatření ochrany obyvatelstva s využitím procesního modelování. *Spektrum*, 2017, roč. 17, č. 1, s. 3-5. ISSN 1804-1639. [80 %]

D – ONDERKOVÁ, V., BRABCOVÁ, V. Případová studie procesu určování prvků kritické infrastruktury silniční dopravy. In *Mezinárodní konference Bezpečnostní technologie, systémy a management: 15. – 16. listopadu 2017, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2017. 5 s. ISBN 978-80-7454-696-9. [40 %]

D – Brabcová, V. Východiska hodnocení kaskádního efektu v systému kritické infrastruktury. In *XV. mezinárodní konferencia mladých vedeckých pracovníkov a doktorandov 2018. Žilina: Fakulta bezpečnostního inžinierstva Žilinskej univerzity v Žiliné*, 2018, 15-24 s. ISBN 978-80-554-1440-9. [100 %]

V<sub>souhrn</sub> – ONDERKOVÁ, V., ŘEHÁK, D., BRABCOVÁ, V., SLIVKOVÁ, S., PATRMAN, D., ŠPLÍCHALOVÁ, A. 2018. Příloha č. 1 Závěrečné zprávy projektu SP2018/116 – *Dynamické modelování resilience prvků kritické infrastruktury*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství. 87 s. [20 %]

V<sub>souhrn</sub> – BRABCOVÁ, V., ŘEHÁK, D., SLIVKOVÁ, S., ONDERKOVÁ, V., NEŠPOROVÁ, V. 2017. Příloha č. 1 Závěrečné zprávy projektu SP2017/87 - *Hodnocení souvztažností v systému kritické infrastruktury*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství. 116 s. [20 %]

V<sub>souhrn</sub> – SLIVKOVÁ, S., ŘEHÁK, D., BRABCOVÁ, V., NEŠPOROVÁ, V., DOPATEROVÁ, M., NOVOTNÝ, P. 2016. Příloha č. 1 Závěrečné zprávy projektu SP2016/99 - *Definování resilience systému kritické infrastruktury*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství. 129 s. [20 %]



Autor:	Ing. Veronika Brabcová
Název:	Kaskádní efekty v systému kritické infrastruktury
Katedra:	Katedra ochrany obyvatelstva (050)
Místo, rok, vydání:	Ostrava, 2019, 1. vydání
Počet stran:	28
Vydavatel:	VŠB – TU Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství
Náklad:	20 ks

**Neprodejné**